

František KREPELKA<sup>1</sup>, Milan LABAŠ<sup>2</sup>, Lucia IVANIČOVÁ<sup>3</sup>, Viera MIKLÚŠOVÁ<sup>4</sup>

## HODNOTENIE VIBRÁCIÍ V ČASOVEJ OBLASTI A ŠTATISTICKÝMI ZNAKMI PRI VRTANÍ HORNÍN

### EVALUATION OF VIBRATIONS IN TIME DOMAIN AND BY STATISTICAL CHARACTERISTICS AT ROCK DRILLING

#### Abstrakt

Príspevok popisuje meranie a hodnotenie vibračného signálu pri vŕtaní hornín na skúšobnom stande. Vibračný signál bol snímaný kapacitným snímačom zrýchlenia vibrácií a bol hodnotený v časovej oblasti a pomocou štatistických znakov (stredná hodnota, štandardná odchýlka, atď.). Bol sledovaný vzostupný trend hodnoty určujúcich štatistických znakov s narastajúcim prítlakom a s narastajúcim počtom otáčok pri vŕtaní hornín s impregnovanými diamantovými korunkami.

#### Abstract

The paper describes measuring and evaluation of forced vibrational signal at rock drilling on testing stand. Vibrational signal was measured by a capacity acceleration transducer and was evaluated in time domain and by statistical characteristics (mean value, standard deviation, etc.). The upward trend of value of determining statistical characteristics with increasing thrust force and with increasing revolution level was found at rock drilling by impregnated diamond bits.

Keywords: Vibrations, rock drilling, time domain, statistical characteristics.

## 1 ÚVOD

Napriek snahe vo výskume a vývoji nemechanických spôsobov rozpojovania hornín a im podobných materiálov zostáva mechanické rozpojovanie dominantnou technológiou pri získavaní nerašných surovín, pozemnom aj podzemnom staviteľstve. Mechanické rozpojovanie je charakterizované interakciou indentora a rozpojovaného materiálu. Pri mechanickom rozpojení hornín je podstatou rozpojovania kontaktné silové pôsobenie rozpojovacieho nástroja na horninu, pričom vznikajú napätia a deformácie v kontaktnej oblasti horniny. Pri dosiahnutí určitého kritického stavu deformácií a napätí dochádza k rozpojení horniny. Veľkosť vyvolaných napätí a deformácií závisí jednak od režimových parametrov práce indentora (prítlak, rýchlosť posuvu alebo rotácie) a jednak od vlastností rozpojovanej horniny.

Rozpojovací proces je charakterizovaný vstupnými veličinami, z ktorých najdôležitejšie sú prítlak  $F$  a otáčky  $n$ . Z výstupných veličín procesu sú najdôležitejšie okamžitá rýchlosť rozpojovania  $v$  a špecifická práca rozpojovania  $w$ . Tieto veličiny sú dôležité z hľadiska energetického hodnotenia procesu. Sledovaním a vyhodnocovaním vstupných a výstupných veličín procesu rozpojovania hornín môžeme tento proces optimalizovať pomocou vhodného matematického aparátu podľa

<sup>1</sup> Ing. František Krepelka, Ph.D., Ústav geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53, tel.: (+421) 55792 2640, e-mail: [krepelka@saske.sk](mailto:krepelka@saske.sk).

<sup>2</sup> Ing. Milan Labaš, Ph.D., Ústav geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53, tel.: (+421) 55792 2648, e-mail: [labas@saske.sk](mailto:labas@saske.sk).

<sup>3</sup> Ing. Lucia Ivaničová, Ph.D., Ústav geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53, tel.: (+421) 55792 2641, e-mail: [ivanic@saske.sk](mailto:ivanic@saske.sk).

<sup>4</sup> Mgr. Viera Miklúšová, Ph.D., Ústav geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53, tel.: (+421) 55792 2639, e-mail: [miklusv@saske.sk](mailto:miklusv@saske.sk).

rôznych hľadísk, napr. dosiahnutie maximálnej rýchlosti rozpojovania alebo minimálnej spotreby energie. Problematické je však snímanie určujúcich veličín v praxi, predovšetkým inštalácia potrebných snímačov na konkrétne strojné zariadenie, či už ide o vrtné súpravy alebo raziace stroje, prípadne iné mechanizmy (Krúpa, Lazarová, 2008, Lazarová, Krúpa, 2006).

V strojárskkej praxi sa na základe dlhoročného výskumu, ktorý naďalej pokračuje, úspešne využívajú rôzne nepriame metódy monitorovania práce strojných zariadení. Nepriame metódy umožňujú kontinuálnu kontrolu stavu ložísk, ďalej monitoring práce rozpojovacieho nástroja pri vŕtaní, frézovaní a iných technológiách na základe snímania a vyhodnocovania rôznych signálov v procese rozpojovania. Nepriame metódy zahŕňajú snímanie silových signálov v procese (prítlak, krútiaci moment), snímanie vibračných signálov procesu (sem možno zaradiť aj akustické merania ako merania vibrácií nesených vzduchom v počuteľnej oblasti vibračného spektra) a snímanie motorického prúdu a prúdu pohonu posuvu (Abu-Mahfouz, 2003, Guo, Ammula, 2005, Jantunen, 2002, Kostúr, Futó, 2007, Leššo, Flegner, 2009, Tandon, Choudhury, 1999).

Výsledky týchto prác ukazujú, že vibračné spektrum pri rozpojovaní je nositeľom informácií o rozpojovacom procese a stave rozpojovacieho nástroja. Snímanie vibračného signálu je pomerne jednoduchá záležitosť, vyžaduje si však určitú rutinu a skúsenosti pri jeho vyhodnocovaní a interpretácii. Vibračný signál určitého technologického procesu je možné vyhodnotiť buď v časovej alebo frekvenčnej oblasti alebo pomocou štatistických znakov (Jantunen, 2002).

Aplikácia snímania a vyhodnocovania vibračného signálu (vrátane akustického) by mohla viesť k jednoduchšiemu spôsobu monitorovania rozpojovacieho procesu hornín. Je tu však niekoľko problémov, ktoré túto aplikáciu sťažujú. Ide najmä o to, že horniny predstavujú, v porovnaní s kovovými, ale aj vyrobenými nekovovými materiálmi, heterogénnu sústavu s lokálne sa meniacimi vlastnosťami, pričom je veľmi obtiažné až nemožné tieto zmeny identifikovať.

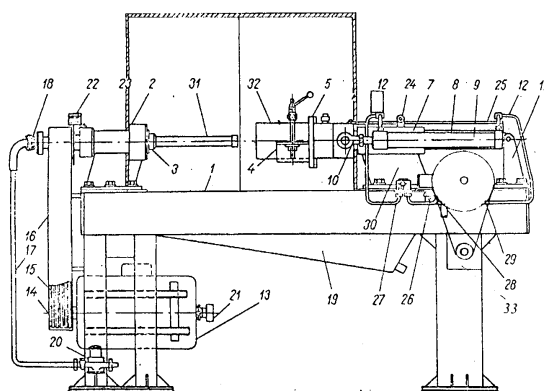
## **2 MERANIE VIBRÁCIÍ PRI ROTAČNOM VŔTANÍ HORNÍN A ICH HODNOTENIE V ČASOVEJ OBLASTI**

Mechanizmus rozpojovania hornín vŕtaním a závislosti vstupných a výstupných veličín procesu rozpojovania hornín sa študujú na vŕtacom laboratórnom stande, ktorý bol skonštruovaný pre výskum rotačného vŕtania hornín. V prevažnej miere sa na rozpojovanie používajú diamantové nástroje impregnované a vsadzované s vonkajším priemerom 46 mm a vnútorným 32 mm. V prezentovanej fáze výskumu sledovania rozpojovacieho procesu sa používali impregnované korunky s 8 a 6 kanálikmi. Impregnované korunky (jemnozrnné diamanty impregnované v kovovej matici) majú tú vlastnosť, že počas svojej životnosti majú takmer rovnaké rozpojovacie vlastnosti, t.j. neprejavuje sa pri ich práci vplyv ich opotrebenia na rozpojovací proces. Pri tomto štúdiu je teda možné sledovať vplyv vstupných parametrov a vlastností hornín na rozpojovací proces.

Výsledky prezentované v tejto práci sú z experimentov, ktoré boli realizované pred rekonštrukciou standu (výmena motora a riadiacej jednotky motora), čomu zodpovedá aj nasledujúci popis tohto zariadenia. Experimenty boli robené na troch typoch hornín.

Vŕtací stand pozostáva z ocelevej konštrukcie, hnacieho jednosmerného elektromotora s výkonom 12,5 kW, vreteníka s jadrovkou a vŕtacieho nástroja (obr.1). Vstupné veličiny, t.j. otáčky a prítlak vŕtacieho standu sa dajú plynule regulovať v intervale 0-30 s-1 a 0-20 000 N.

Mechanické kmity a vibrácie boli snímané kapacitným snímačom zrýchlenia ADXL 250 firmy ANALOG DEVICES v dvoch smeroch, kolmo na os rotácie rozpojovacieho nástroja v horizontálnej rovine a rovnobežne s osou rozpojovacieho nástroja. Snímače boli mechanicky uchytené na rám vŕtacieho standu.



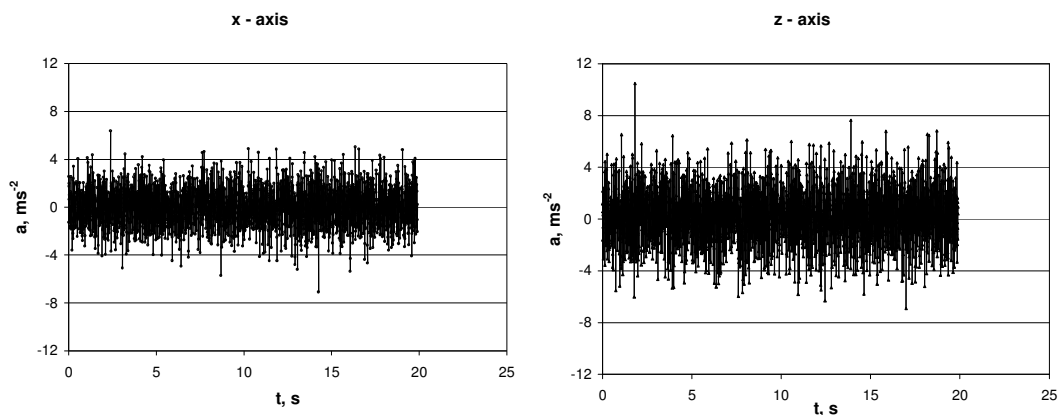
Obr.1: Schéma skúšobného vŕtacieho standu ÚGt SAV v Košiciach. Niektoré dôležité uzly: 1- oceľový rám, 2-vreteník, 3-jadrovka, 4-držiak vzorky, 7-hydraulický posuv, 13-elektromotor, 31-korunka, 32 vzorka.

Meracie zariadenie vibrácií pozostávalo z nasledujúcich prvkov:

- Kapacitný snímač zrýchlenia ADXL 250,
- Analógový dvojnásobný integrátor,
- Pamäťový osciloskop,
- Počítač s riadiacou doskou DS 1102.

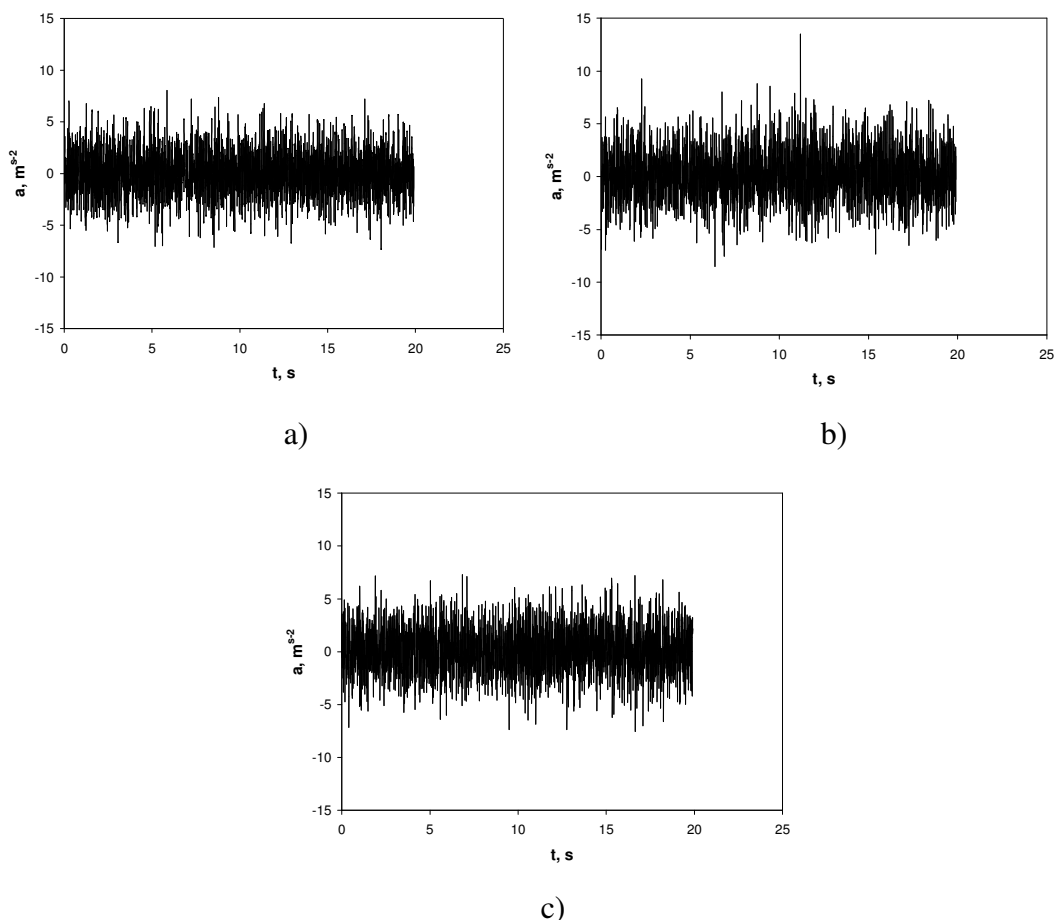
Signál zo snímača vibrácií sa privádzal do dvojnásobného analógového integrátora, ktorý na výstupe dával hodnotu posunu. Takto zosnímaný signál zrýchlenia a analógovo spracovaný signál polohy sa vzorkovali prevodníkom riadiacej dosky DS 1102 a ukladali do súboru nameraných dát v prostredí tabuľkového procesora Excel. Uložené dáta zrýchlenia a posunov vibrácií pri rozpojovaní hornín bolo možné ďalej vyhodnocovať. Náhodný súbor zrýchlenia a posunov bol zapisovaný počas cca 20 sekúnd merania v kroku 0,008 sekundy, takže obsahoval cca 2 500 hodnôt týchto veličín v dvoch na seba kolmých smeroch. Vibrácie pri vŕtaní sa merali a zaznamenávali pri konštantných otáčkových hladinách  $n$  a pri postupne sa meniacich hodnotách prítlaku  $F$ .

Časové záznamy zrýchlení vibrácií v osi  $x$  a  $z$  pri vŕtaní andezitu sú prezentované na obr.2.



Obr.2: Časové záznamy zrýchlení vibrácií v osi  $x$  a osi  $z$  pri vŕtaní andezitu Ruskov, režimové parametre  $F=5759$  N,  $n=1134$  min<sup>-1</sup>.

Náhodné súbory zrýchlenia vynútených vibrácií sa namerali pri rozpojovaní andezitu Ruskov, žuly Hnilec a vápenca Včeláre (obr.3a-c).



Obr.3: Časové záznamy zrýchlení vibrácií zosnímané pri režime  $F=11360$  N,  $n=970$  pri vŕtaní troch typov hornín: a) andezit Ruskov, b) žula Hnilec, c) vápenec Včeláre.

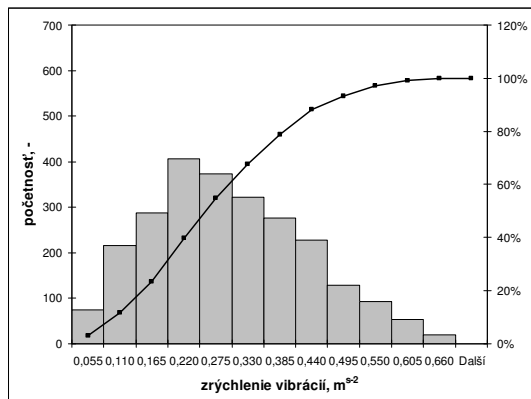
Z obrázkov je zrejmé, že absolútne hodnoty zrýchlení vibrácií v smere osi  $z$  (os postupu vŕtania) sú výrazne vyššie ako v smere osi  $x$ . Ďalej možno ešte konštatovať, že najmenej konzistentný záznam bol u žuly, čo je zrejme spôsobené granitickou štruktúrou s rôznou veľkosťou jednotlivých minerálnych zŕn. Ďalšia interpretácia časových záznamov je zbytočná a nejasná vzhľadom na neprehľadnosť takýchto typov grafov, či už ide o záznamy z vŕtania jedného typu horniny pri rôznych režimových parametroch alebo o záznamy z vŕtania rôznych typov hornín.

### 3 HODNOTENIE VIBRAČNÉHO SPEKTRA ZRÝCHLENÍ ŠTATISTICKÝMI ZNAKMI

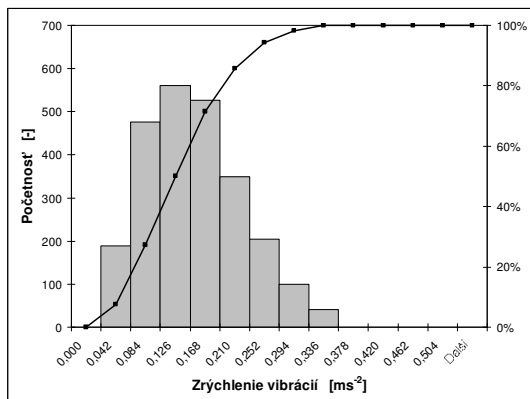
Z nasnímaných náhodných súborov zrýchlenia vibrácií v smere osi vŕtania a kolmo na túto os v horizontálnej rovine v príslušnom čase bola určená absolútna hodnota zrýchlenia. Takto určené absolútne hodnoty zrýchlenia v časovej oblasti sa ďalej hodnotili štatisticky vzostupným usporiadaním podľa absolútnej veľkosti a následným zatriedením do tried početností. Počet tried náhodného súboru zrýchlenia vibrácií bol určený podľa Sturgesovho pravidla. V súboroch boli

vyhodnocované charakteristiky polohy: vážený aritmetický priemer (stredná hodnota) a medián a charakteristiky variability: variačné rozpätie, rozptyl, štandardná odchýlka, šikmosť, špicatosť.

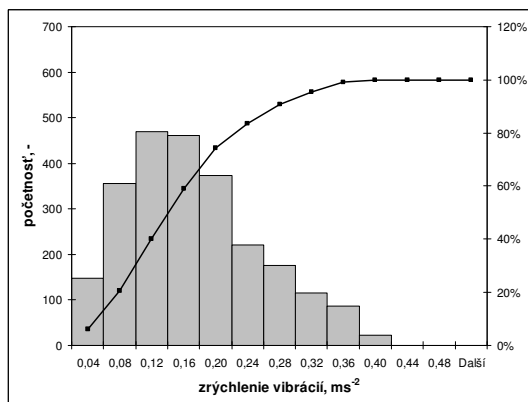
Na obrázku 4(a-c) sú histogramy početností a kumuláty súborov zrýchlenia pri rozpojovaní 3 typov hornín 8-kanálikovou impregnovanou korunkou.



a)



b)



c)

Obr.4: Histogramy početností a kumuláty súborov zrýchlenia pri rozpojovaní troch typov hornín pri režime  $F=11360\text{ N}$ ,  $n=970\text{ min}^{-1}$ : a) andezit Ruskov, b) žula Hnilec, c) vápenec Včeláre.

Z histogramov vidno, že u všetkých troch typov hornín je medián menší ako stredná hodnota súboru (geometricky medián predstavuje hodnotu, ktorá rozdeľuje plochu ohraničenú osou náhodnej premennej a krivkou hustoty rozdelenia pravdepodobnosti jej výskytu na dve polovice). To je typické aj pre Weibullovo rozdelenie, ktoré sa často aplikuje pri štatistickom hodnotení pevnostných vlastností hornín. U normálneho rozdelenia je medián totožný so strednou hodnotou.

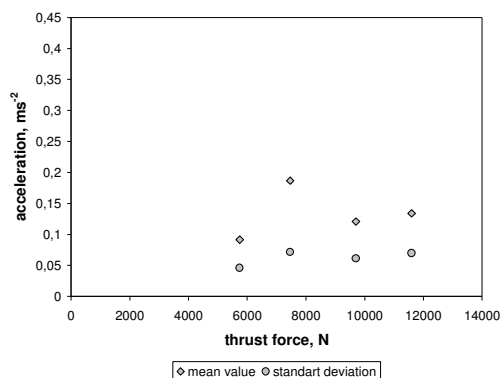
Vo všetkých hodnotených súboroch bol medián menší ako stredná hodnota, hodnota šikmosti bola u všetkých súborov kladná, t.j. rozdelenie hodnôt zrýchlení vibrácií je zošikmené zľava, čo je opäť typické aj pre Weibullovo rozdelenie.

Hodnoty špicatosti boli vo všetkých hodnotených súboroch záporné, čo poukazuje na ploché rozdelenie.

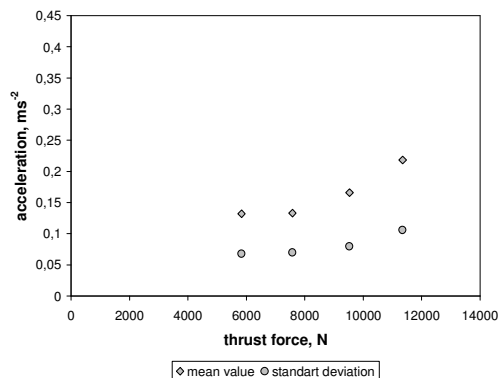
Na obrázku 5(a-d) sú znázornené hodnoty strednej hodnoty a štandardnej odchýlky súboru absolútnych hodnôt zrýchlení vibrácií pri vŕtaní andezitu Ruskov pri rôznych otáčkových hladinách.

Stredná hodnota a aj štandardná odchýlka (ako charakteristika variability s rozmerom náhodnej veličiny, na rozdiel od rozptylu) zrýchlení vibrácií vykazujú určitý vzostupný trend s narastajúcim

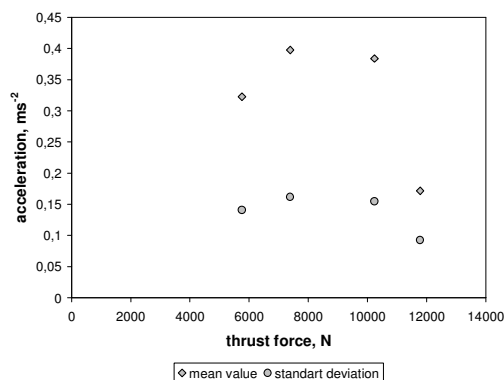
prítlakom s výnimkou záznamu, ktorého štatistické znaky sú na obr.5c. Príčinou tejto anomálie môže byť heterogenita danej vzorky andezitu, zrejme tam bola nejaká poruchová zóna, ktorá spôsobila intenzívnejšie rozkmitanie celej sústavy hornina – rozpojovací nástroj. Z obrázkov ďalej vyplýva, že s nárastom počtu otáčok rástla hodnota strednej hodnoty aj štandardnej odchýlky, opäť s výnimkou prípadu 5c.



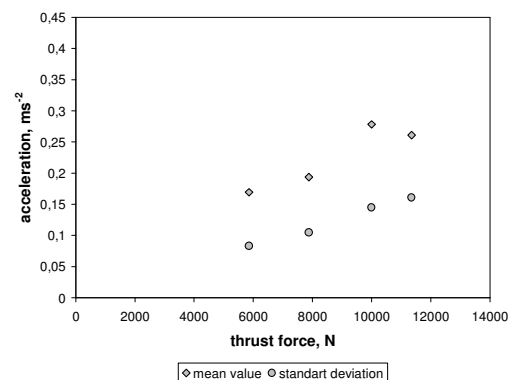
a)



b)



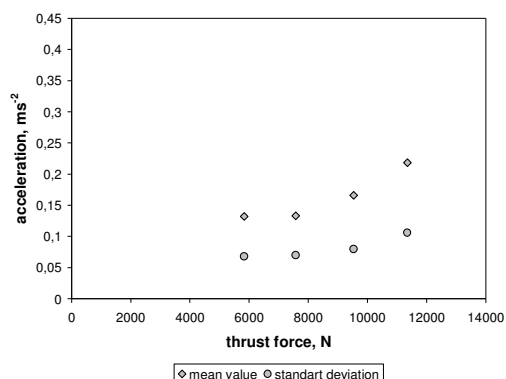
c)



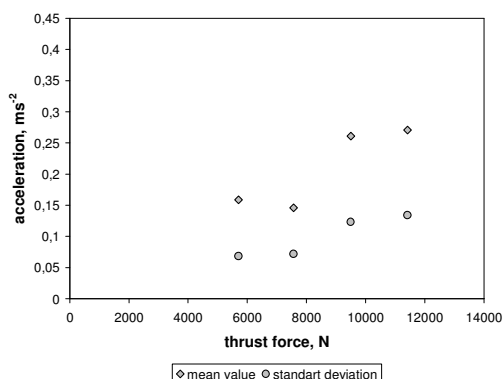
d)

Obr.5: Hodnoty strednej hodnoty a štandardnej odchýlky zrýchlení vibrácií vyhodnotené pri vŕtaní andezitu 8-kanálikovou korunkou pri rôznych otáčkových hladinách: a)  $n=790 \text{ min}^{-1}$ , b)  $n=1000 \text{ min}^{-1}$ , c)  $n=1130 \text{ min}^{-1}$ , d)  $n=1350 \text{ min}^{-1}$ .

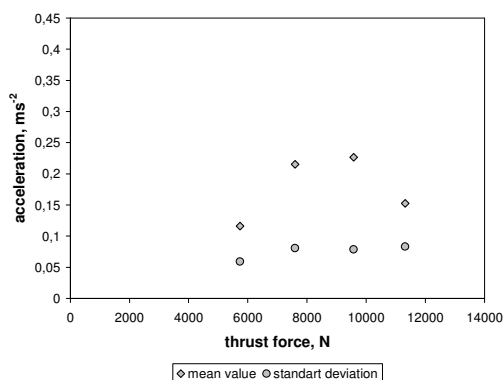
Na obrázku 6(a-c) je porovnanie hodnôt stredných hodnôt a štandardných odchýlok súborov zrýchlení vibrácií pri rozpojovaní troch typov hornín pri rovnakej otáčkovej hladine  $n=1000 \text{ min}^{-1}$ .



a)



b)



c)

Obr.6: Hodnoty strednej hodnoty a štandardnej odchýlky súborov zrýchlení vibrácií pri vŕtaní troch typov hornín 8-kanálikovou korunkou pri otáčkovej hladine  $n=1000 \text{ min}^{-1}$  : a) andezit Ruskov, b) žula Hnilec, c) vápenec Včeláre.

Aj tu je zrejmý trend nárastu oboch štatistických znakov s narastajúcim prítlakom u súborov zrýchlení vibrácií u andezitu a žuly. V prípade vápenca bol trend rastu len u štandardnej odchýlky, u strednej hodnoty po úvodnom trende rastu došlo k výraznému poklesu jej hodnoty. Príčinou opäť mohla byť nejaká heterogenita danej vzorky.

#### 4 DISKUSIA A ZÁVER

Absolútne hodnoty zrýchlení vibrácií v smere osi z (os postupu vŕtania) sú výrazne vyššie ako v smere osi x.

Z histogramov vidno, že u všetkých troch typov hornín je medián menší ako stredná hodnota súboru (geometricky medián predstavuje hodnotu, ktorá rozdeľuje plochu ohraničenú osou náhodnej premennej a krivkou hustoty rozdelenia pravdepodobnosti jej výskytu na dve polovice). To je typické aj pre Weibullovo rozdelenie, ktoré sa často aplikuje pri štatistickom hodnotení pevnostných vlastností hornín.

Hodnota šikmosti bola u všetkých súborov kladná, t.j. rozdelenie hodnôt zrýchlení vibrácií je zošikmené zľava, čo je opäť typické aj pre Weibullovo rozdelenie.

Pre vŕtanie kovov a iných homogénnych materiálov je typické normálne rozdelenie a odchýlka od neho, t.j. zošikmenie, je typické pre opotrebenie alebo poruchu vŕtáku (Jantunen, 2002).

Stredná hodnota a aj štandardná odchýlka zrýchlení vibrácií vykazujú určitý vzostupný trend s narastajúcim prítlakom s výnimkou záznamu, ktorého štatistické znaky sú na obr.5c. Príčinou tejto anomálie môže byť heterogenita danej vzorky andezitu.

S nárastom počtu otáčok rástla hodnota strednej hodnoty aj štandardnej odchýlky, opäť s výnimkou prípadu 5c.

Porovnanie hodnôt strednej hodnoty a štandardnej odchýlky súborov zrýchlení vibrácií pri víťaní troch typov hornín 8-kanálikovou korunkou pri otáčkovej hladine  $n=1000 \text{ min}^{-1}$  ukázalo trend nárastu oboch štatistických znakov s narastajúcim prítlakom u súborov zrýchlení vibrácií u andezitu a žuly. V prípade vápenca bol trend rastu len u štandardnej odchýlky, u strednej hodnoty po úvodnom trende rastu došlo k výraznému poklesu jej hodnoty. Príčinou opäť mohla byť nejaká heterogenita danej vzorky.

## POĎAKOVANIE

Príspevok bol vytvorený realizáciou projektu „Centrum excelentného výskumu získavania a spracovania zemských zdrojov“ na základe podpory operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja, v aktivite č.1.2 „Identifikácia mechanických vlastností nerastných surovín“.

This contribution is the result of the project implementation "Research excellence centre on earth sources extraction and treatment" supported by the Research & Development Operational Programme funded by the ERDF, in the activity nr.1.2. „Identification of mechanical properties of raw materials“.

## LITERATURA

- [1] ABU-MAHFOUZ, I. Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network. *Int. J. Machine tools & Manufacture*. 2003, Nr.43, pp. 707-720, ISSN 0890-6955
- [2] GUO, Y.B. & AMMULA, S.C. Real-time acoustic emission monitoring for surface damage in hard machining. *Int. J. Machine tools & Manufacture*. 2005, Nr.45, pp.1622-1627, ISSN 0890-6955
- [3] JANTUNEN, E. A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling. *Int. J. Machine tools & Manufacture*. 2002, Nr.42, pp.997-1010, ISSN 0890-6955
- [4] KOSTÚR, K. & FUTÓ, J. Optimization of rock disintegration based on acoustic background of drilling machine. *Mechanics*. 2007, Vol.26, pp.1-7, ISSN 1734-8927
- [5] KRÚPA, V. & LAZAROVÁ, E. Mathematical interpretation of monitoring results of the rock mass and TBM interaction. *Acta Montanistica Slovaca*. 2008, Roč.13, č.1, pp.33-38, ISSN 1335-1788
- [6] LAZAROVÁ, E. & KRÚPA, V. Skúsenosti z plnoprofilového razenia prieskumných štôlní pre tunelové rúry. *Acta Montanistica Slovaca*. 2006, Roč.11, č.2, pp.330-334, ISSN 1335-1788
- [7] LEŠŠO, I. & FLEGNER, P. Špecifikácia príznakov procesu rozpojovania hornín rotačným víťaním pre účely riadenia procesu. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – TU Ostrava, řada stavební*. 2009, Vol.9, Nr.2, pp.155-165, ISSN 1213-1962
- [8] TANDON, N. & CHOUDHURY, A. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology International*, Nr.32, pp.469-480, ISSN 0301-679X

## Oponentní posudek vypracoval:

Doc. RNDr. Radek Kučera, Ph.D., VŠB – Technická univerzita Ostrava